北京上空中层顶区域重力波参数关系的激光雷达研究

龚少华[1,2],刘正宽[2],关 塞[2],焦 菁[2],沈振江[1],羊大力[1],孙书娟[1],陈春霞[1]

(1. 海南师范大学 物理与电子工程学院,海南 海口 571158;
2. 中国科学院空间天气国家重点实验室,北京 100190)

摘 要: 基于子午工程项目北京钠激光雷达的长期观测数据 (2010 年 4 月到 2011 年 9 月), 采用 Yang 等人(2008)的重力波参数提取方法,提取了在 253 个夜晚 2 208 h 的有效观测时间里出现的 162 个钠层单色重力波的垂直波长、周期、幅度值和幅度增长因子参数值。统计分析显示激光雷达所观测到的中层顶区域重力波具有系统性的参数关系,$\lambda_z=0.226T_{ob}^{0.530}$、$KE=6.66\times10^{-10}\ k_z^{-3.091}$ 和 $KE=8.97\times10^{-6}\times f_{ob}^{-1.696}$。这些实验观测结果验证了 Gardner(1994)扩散滤波理论的结果,但同时发现仅认为波致涡流扩散是重力波衰减的主要途径是不完全正确的,其它因素引起的衰减在重力波的饱和和耗散机制中也起到了重要作用。

关键词: 大气重力波; 参数关系; Na 激光雷达
中图分类号: P356 **文献标志码**: A **文章编号**: 1007-2276(2015)04-1134-07

Lidar study on the parameter relations of gravity waves in the mesopause region at Beijing

Gong Shaohua[1,2], Liu Zhengkuan[2], Guan Sai[2], Jiao Jing[2], Shen Zhenjiang[1], Yang Dali[1], Sun Shujuan[1], Chen Chunxia[1]

(1. School of Physics and Electronics Engineering, Hainan Normal University, Haikou 571158, China;
2. State Key Laboratory of Space Weather, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Based on the long-term observations from Beijing sodium lidar of Chinese Meridian Project, 162 monochromatic gravity waves was distinguished in the sodium layer during the 2208 hours' observation in 253 nights (from 2010 April to 2011 September). The vertical wavelength, wave period, wave amplitude and its growth factor of every monochromatic gravity wave were precisely extracted with the method derived by Yang et al.(2008). Statistical results reveal that there are systematic relationships between those wave parameters, and they respectively are $\lambda_z=0.226T_{ob}^{0.530}$, $KE=6.66\times10^{-10}\ k_z^{-3.091}$ and $KE=8.97\times10^{-6}\ f_{ob}^{-1.696}$. Those results partially agree well with the results predicted by Gardner's(1994) diffusive filtering theory. However, it is found incorrect to regard the wave-induced eddy diffusivity as the only main damping processes of gravity waves. It is suggested that the damping processes caused by other possible factors also play important roles in the saturation and dissipation mechanisms of gravity waves.

Key words: atmospheric gravity waves; parameter relations; sodium lidar

---

收稿日期:2014-08-09; **修订日期**:2014-09-11

基金项目:国家自然科学基金(41264006;41174129);海南省自然科学基金(413127;20154191);博士后研究基金(20110490609);国家重点实验室专项基金

作者简介:龚少华(1976-),男,教授,主要从事大气激光遥感技术和微纳结构的激光光谱学研究。Email:shhgong@hainnu.edu.cn

0 引 言

大气重力波活动是一种大气中常见的物理现象，大气的温度、密度、风场等特征参量会随着重力波活动发生振荡起伏；同时重力波活动将能量和动量从低层大气传输到中间层上部及低热层中，对大气中大尺度物质、能量和动量的交换和重新分配有着重大影响。中层顶区域重力波活动频繁，通过重力波的传播实现低层大气和高层大气的耦合；对此区域中重力波活动的研究将有利于对大气中的物质、能量和动量的传播、沉积以及收支平衡的动力学过程的理解[1]。

由于钠层中的 Na 原子是中层顶区域重力波活动很好的示踪物质，具有高时间和空间分辨率的 Na 激光雷达是研究该区域重力波的传播、饱和和耗散特征的有效工具[2-4]。基于激光雷达的长期观测，Gardner(1994)等研究了重力波的参数关系，并提出了扩散滤波理论[5]。该理论认为波致涡流扩散效应是重力波耗散的主要途径；重力波在向上传播的过程中会被背景大气选择性吸收，只有那些涡流扩散速度小于垂直相速度的波才能向上传播，重力波垂直波数谱相应地出现选择性滤波效应；并且由此得出雷达观测到的中层顶区域重力波是趋近饱和的，具有系统性参数关系 $\lambda_z \propto T_{ob}^{0.5}$、$KE \propto k_z^{-3}$ 和 $KE \propto f_{ob}^{-5/3}$。然而，重力波的线性饱和理论认为重力波垂直波数谱的形状和幅度值是由风剪切和对流不稳定性控制的，饱和重力波的垂直波数谱在高波数区域的谱指数近似为 $n=-3$[6]。Hines(1991)的多普勒扩展理论和 Weinstock 的尺度相关的扩散理论则分别认为重力波的饱和和耗散完全由波–波相互作用的非线性效应和混沌扩散运动控制[7-8]。

基于国家“子午工程项目”的北京激光雷达站的大量观测数据，文章采用 Yang 等的重力波参数提取方法[9]，提取了 162 个 Na 激光雷达观测到的单色重力波的垂直波长、周期、幅度值和幅度增长因子等参数值，分析了北京上空雷达观测到的中层顶区域重力波的参数关系，从而验证了大气重力波的相关理论。

1 钠层重力波参数提取方法

基于大气动力学基本原理，Gardner and Voelz 给出了钠层重力波扰动和参数之间的关系[4]：

$$n_s(\bar{r},t)=\frac{n_0\{z-\gamma H\ln[1+[Ae^{\beta z}/(\gamma-1)]\cos(\omega t-\bar{k}\cdot\bar{r})]\}}{\{1+[Ae^{\beta z}/(\gamma-1)]\cos(\omega t-\bar{k}\cdot\bar{r})]\}} \quad (1)$$

式中：$n_s(\bar{r},t)$为钠层密度对重力波的响应；n_0 为本底钠层；$Ae^{\beta z}$ 为重力波在高度 z 处的幅度值；β 为幅度增长因子；ω 为重力波频率；$\bar{k}=k_x\hat{x}+k_z\hat{z}$为波数矢量；$H$ 为大气标高；γ 为热熔比；$\bar{r}=x\hat{x}+z\hat{z}$为位置坐标；$t$ 为时间。

在重力波的幅度不太大的情况下，仅考虑重力波的线性扰动，式(1)可以转换为式(2)，

$$n_s(\bar{r},t)\approx n_0(z)-[n_0(z)+\gamma H\frac{dn_0(z)}{dz}]\frac{Ae^{\beta z}}{\gamma-1}\cos(\omega t-\bar{k}\cdot\bar{r}) \quad (2)$$

由于重力波引起的钠密度扰动和大气密度扰动直接相关，相对钠密度扰动(r_{Sodium})可以用大气密度扰动($r_{Atmosphere}$)表示为[2]：

$$r_{Sodium}\approx-\frac{1+\frac{\gamma H}{n_0}\frac{dn_0}{dz}}{\gamma-1}r_{Atmosphere}\approx -\frac{1+\frac{\gamma H}{n_0}\frac{dn_0}{dz}}{\gamma-1}Ae^{\beta z}\cos(\omega t-\bar{k}\cdot\bar{r}) \quad (3)$$

采用 Yang (2008) 等的方法，利用 Levenberg–Marquardt 拟合方法，找到较为真实的本底钠层 n_0，计算出重力波活动导致的钠层密度扰动 $\Delta n_s=(n_s-n_0)/n_0$，就能由式(3)得到重力波线性扰动对应的大气密度扰动 $\frac{\Delta N}{N}\approx Ae^{\beta z}\cos(\omega t-\bar{k}\cdot\bar{r})$；通过测量大气密度扰动廓线中相邻波腹之间的平均间距，就可以得到重力波的垂直波长 λ_z；同时对重力波扰动廓线的波腹作线性拟合 $\log(Y_i)=\log(A)+\beta\cdot z_i$，就可以得到重力波在不同高度上的幅度值 $Ae^{\beta z}$，也可得到重力波在传播中的幅度增长因子 β[9]。另外，在密度廓线序列中测量波峰(谷)向下的移动速度，就得到了重力波的垂直相速度 c_z。重力波的观测周期 T_{ob} 就可以通过 $c_z=\lambda_z/T_{ob}$ 计算出来[4]。

对于大多数低频重力波而言，在满足 $|2k_zH|>>1$ 的情况下，由重力波的非线性色散关系，单色重力波 KE 动能可以计算为[4]：

$$KE(\bar{k},\omega)=\frac{1}{2}|v_x|^2+\frac{1}{2}|v_y^2|\approx\frac{\gamma Hg}{2(\gamma-1)}(Ae^{\beta z})^2 \quad (4)$$

其中 v_z 和 v_x 分别为由于重力波扰动所产生的竖

直和水平方向上的风速。

需要说明的是，使用上述方法准确提取重力波参数时，需要注意下列四个前提假设[3]：(1)钠层密度分布具有水平均匀性；(2)有重力波活动时，钠层化学反应对钠层的影响很小；(3)忽略重力波扰动引起的扩散和化学反应效应变化；(4)除了化学反应和钠层水平运动外，钠层的变化主要是由重力波扰动引起的。其中，(1)–(2)假设主要是用来排除钠层中出现明显钠层突发或垂直风剪切的情况，这在重力波参数提取时，通过观察钠层形态变化就能做出正确判断。对于第(3)–(4)假设，Xu 的理论模型研究都指出，由于化学反应的时间周期较长，在研究重力波扰动时，钠层化学反应效应变化的影响可以不考虑[10]。实际情况下，化学反应和水平不均匀性的影响是必然存在的；所以，在重力波参数提取时，需要根据钠层形态变化的实际情况正确估计这些因素对重力波参数准确性的影响。

2 激光雷达观测结果

从2010年4月到2011年9月，在北京Na激光雷达的253个夜晚(2208 h)的有效观测数据里，共计观测到了162个单色重力波事件。基于上述的重力波参数提取方法，提取了每一个重力波的垂直波长λ_z、周期T_{ob}、幅度增长因子β和幅度值$Ae^{\beta*90\mathrm{km}}$，并在图1中对应地画出了出现的时间分布图。观测到的重力波波长的平均值为3.73 km，周期的平均值为3.38 h，在90 km处的平均幅度值为2.94%。

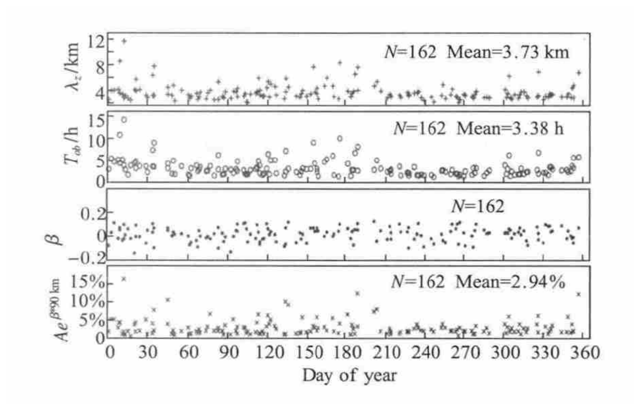


图1 激光雷达观测到中层顶区域重力波的参数值及对应出现时间分布图

Fig.1 Distribution of the wave parameters versus the day number of year, which is observed in the mesopause region by lidar

图2的统计显示，重力波的垂直波长λ_z分布在2~11.88 km，常见的重力波波长为2~4 km；对应的周期T_{ob}分布在1.03~14.97 h，常见的周期为1~4 h；重力波的幅度值都小于20%，常见的重力波幅度值小于4%。

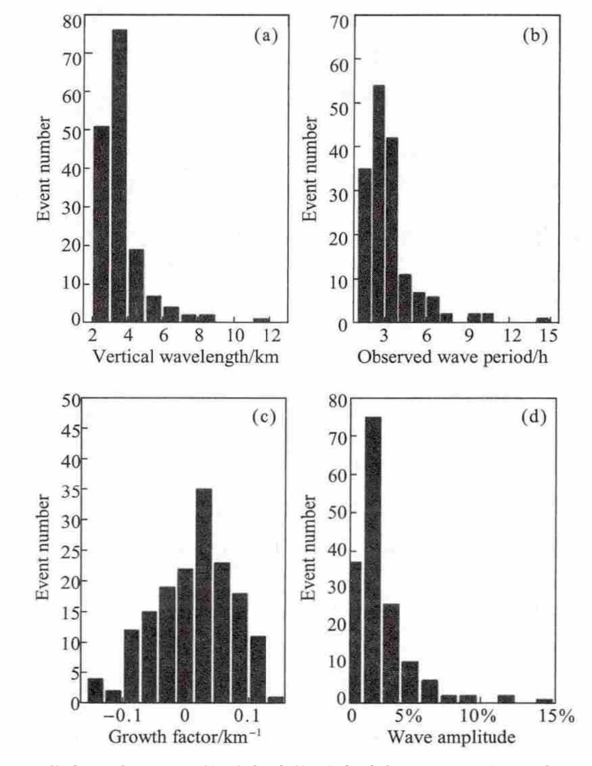


图2 激光雷达观测到的重力波的垂直波长、观测周期、增长因子和幅度值的统计直方图

Fig.2 Histograms of the vertical wavelength, observed period, growth factor, and wave amplitude for AGWs observed by lidar

基于上面得到的各个重力波参数值，对北京上空激光雷达观测到的中层顶重力波的参数关系作了如下的详细分析。

图3是重力波垂直波长λ_z与周期T_{ob}之间的对数坐标关系，可以看出两者具有很强的系统相关性。对图中这些数据点作$\lambda_z=CT_{ob}^p$的最大似然拟合，发现在北京观测到的重力波有$T_{ob}^{0.530}$对垂直波长λ_z的系统相关性(虚线)，即$\lambda_z=0.226T_{ob}^{0.530}$；尽管认为背景大气风场的Doppler效应会给周期T_{ob}的测量带来较大的Doppler偏差，其拟合相关系数仍达到了$r^2=0.819$。同时，分别对出现在夏季(3~8月份)和冬季(9~12月，1~2月)的重力波作了统计分析；在两个季节里，垂直波长λ_z与周期T_{ob}之间的关系分别是$\lambda_z=0.245T_{ob}^{0.519}$和$\lambda_z=0.201T_{ob}^{0.547}$。从夏季到冬季，观测到的$C$、$p$值变化较大，这说明在北京地区重力波活动的季节变化较明显。

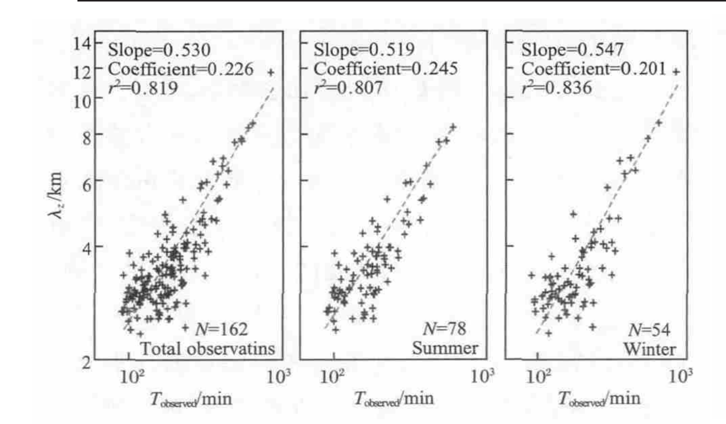


图 3 激光雷达观测到的重力波垂直波长长 λ_z 与周期 T_{ob} 之间的系统关系。虚线是对数据点的 $\lambda_z=CT_{ob}^p$ 最大似然拟合，其中 C 是拟合得到的常数系数，p 是斜率。r^2 是拟合相关系数

Fig.3 Systematical relations between the vertical wavelength λ_z and period T_{ob} of gravity waves observed by lidar. Dash lines are the maximum likelihood fits to the data in form of $\lambda_z=CT_{ob}^p$, where C is the constant coefficient and p is the slope of logarithmic plot. r^2 is the correlation coefficient of fitting

图 4 和图 5 分别给出了观测到的重力波在90 km处的 KE 动能与波数($k_z/2\pi$)和频率(f_{ob})之间的关系，发现 KE 动能和波数之间有 $KE=6.66\times10^{-10}k_z^{-3.091}$ 的系统相关性，KE 动能和频率之间有的相关性 $KE=8.97\times10^{-6}k_{ob}^{-1.696}$，且这些参数关系在夏季和冬季也略有不同。

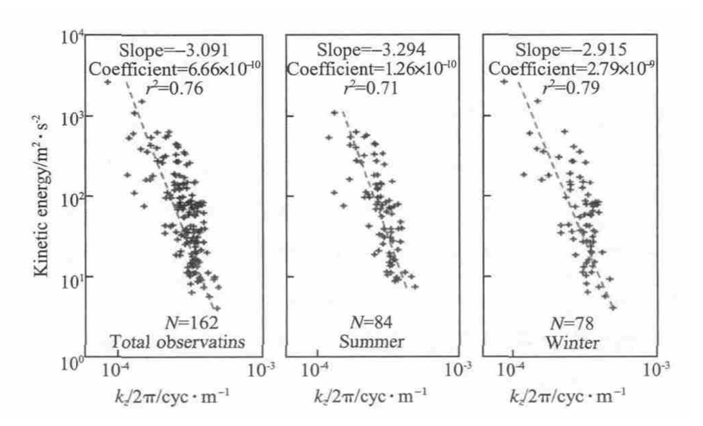


图 4 激光雷达观测到重力波的 KE 动能与波数 $k_z/2\pi$ 的系统关系。虚线是对数据点的 $\lambda_z=CT_{ob}^p$ 最大似然拟合，其中 C 是拟合得到的常数系数，p 是斜率。r^2 是拟合相关系数

Fig.4 Systematical relations between the kinetic energy and wave number of gravity waves observed by lidar. Dash lines are the maximum likelihood fits to the data in form of $\lambda_z=CT_{ob}^p$, where C is the constant coefficient and is p the slope of logarithmic plot. r^2 is the correlation coefficient of fitting

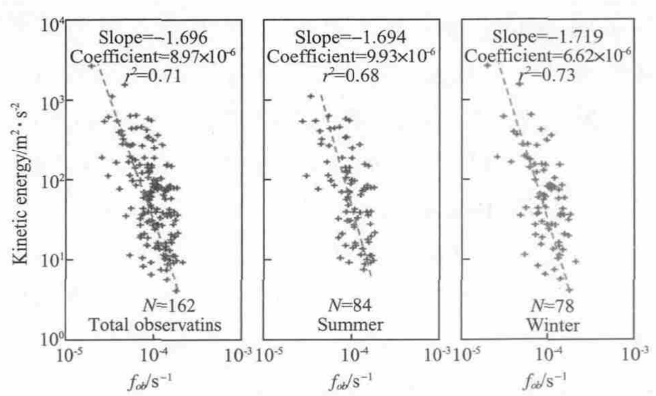


图 5 激光雷达观测到重力波的动能与频率 f_{ob} 的系统关系。虚线是对数据点的 $\lambda_z=CT_{ob}^p$ 最大似然拟合，其中 C 是拟合得到的常数系数，p 是斜率。r^2 是拟合相关系数

Fig.5 Systematical relations between the kinetic energy and frequency of gravity waves observed by lidar. Dash lines are the maximum likelihood fits to the data in form of $\lambda_z=CT_{ob}^p$, where is C the constant coefficient and p is the slope of logarithmic plot. r^2 is the correlation coefficient of fitting

3 结果讨论

从激光雷达的观测数据里准确提取重力波的参数值，找到钠层密度分布的真实本底是至关重要的。Gardner and Voelz 在认为本底钠层密度呈高斯分布的基础上，采用计算重力波垂直波数谱的方法提取了重力波参数，如垂直波长、振幅、增长因子等[4]。但是，由于钠源和钠汇是动态变化的，且受大气输运过程影响，本底钠层形状是不断变化的，且常常偏离高斯分布的。所以，采用 Gardner and Voelz 的方法，会给重力波参数的提取结果带来巨大偏差[9]。这里采用 Yang(2008)等的参数提取方法，利用平均钠层作为初始本底钠层，再采用 Levenberg−Marquardt 拟合方法，逐步逼近真实本底钠层。这种重力波参数提取方法是对 Gardner and Voelz 方法的重大改进，能更准确地给出本底钠层和重力波参数。

对于单色重力波事件的确定，这里采用 Beatty 等所描述的标准[11]：(1)钠密度廓线呈明显的波状扰动结构；(2)这种扰动结构至少连续出现在 3~5 个钠密度廓线中，即出现时间超过 10 min；(3)这些波状扰动结构具有较一致的向下传播相速度。在北京所观测到的 162 个单色重力波事件都符合上述条件。当然，对于那些近似水平传播的重力波和明显出现

Doppler 频移的重力波来说，这个判据会给重力波事件的数目统计带来一些误差。并且，雷达观测到的重力波周期 T_{ob} 也应该是受到钠层背景风场的 Doppler 频移效应影响后的周期，而不是重力波本身的固有周期。但是，Beatty 等人认为，由于雷达观测到的重力波的波长和周期往往具有明显的系统相关性（如图 3 所示），这些重力波应该很少受到钠层背景风场的 Doppler 频移效应影响[11]。在完成激光雷达和 Radar 观测结果的对照后，Collins 等人也认为雷达在中层顶区域所观测到的都是没有明显受到背景风场 Doppler 频移效应影响的重力波，观测到的重力波参数值可以代替重力波的固有参数值[12]。

图 2 中的统计分析显示，随着波长、周期或幅度值的增加重力波出现的次数急剧减少，这说明在北京上空中层顶附近雷达观测到的主要是中小尺度、短周期重力波。在相似纬度上，Illinois(40°10′N,88°10′W)激光雷达小组也报道了相同的观测结果；在其它纬度上，Yang、Beatty、Collins 等的雷达观测也给出了相同的结论[4,11,13]。

关于钠激光雷达对重力波的观测范围，Gardner and Taylor 指出，钠密度激光雷达对重力波的观测精度相当高，理论上能观测到尺度和激光雷达的分辨率相当的小尺度重力波(垂直波长几百米、周期几分钟)。但是，由于激光器输出能量的涨落和背景噪声的影响，通常实际能准确分辨的最小尺度重力波的波长大致在 2 km 波长左右，周期 30 min 左右。同时，由于钠层本身的厚度限制，激光雷达不可能观测到大尺度的重力波(垂直波长超过 15 km，同时周期大于 5 h)[14]。这里北京激光雷达所观测到的最大尺度重力波的垂直波长为 11.88 km，周期为 898.25 min. 这和 Beatty (1992，12.8 km)、Gardner and Voelz(1987，17 km)和 Yang(2008，11.6 km)等的报道结果相类似。最小尺度的重力波的垂直波长为 2 km，也和其它地方的报道相仿。若需要观测到中层顶附近更小尺度的重力波，不仅需要提高雷达的空间分辨率，而且需要有效地降低背景和系统噪声。关于光子噪声和激光器输出能量涨落引起的重力波参数的测量误差，Gardner and Voelz(1987，公式(54–55))已作了详细的分析[4]。在通常情况下，由于光子噪声和激光能量涨落的影响，垂直波长 λ_z 的误差小于 1%，重力波的观测周期 T_{ob} 的偏差则小于 3%。

由于大气密度随高度的增加会明显减小，大多数重力波理论都认为，随着高度的增加重力波幅度值会不断增长，直至饱和。实际上，重力波在传播过程中会受到背景大气的吸收、反射和耗散等作用，重力波的幅度并不一定是随高度的增加而增大的。图2 显示，几乎一半的重力波的幅度值增长因子 β (Growth Factor)是负值。这说明在中层顶附近激光雷达观测到的重力波的幅度并不是随高度的增加都增大的。Gardner 的扩散滤波理论认为只有那些有效垂直扩散速率(k_zD)小于垂直相速度(ω/k_z)的重力波的幅度才会随高度的增加而增大，即 $Dk_z^2 \leqslant \omega$；其他重力波将会被严重衰减而消失[5]。Yang 等在 São José dos Campos(23°N，46°W)用激光雷达首先观测到中层顶附近重力波的这种衰减现象[4]；这里北京激光雷达对中层顶附近重力波活动的研究也发现，重力波的幅度并不都是随高度的增加而增大的。

几乎所有的雷达观测结果都报道了中层顶区域重力波的垂直波长 λ_z 与周期 T_{ob} 之间有类似的系统性关系 $\lambda_z \propto T_{ob}^{0.5}$。在 Illinois (40°10′N,88°10′W)，Gardner and Voelz 得到了 $\lambda_z=0.24T_{ob}^{0.57}$ 波长与周期之间存在的相关性[4]；后来 Collins 等在分析 Wind/Temperature 钠雷达数据的基础上，得到了 $\lambda_z=0.42T_{ob}^{0.43}$ 的关系[12]；在 São José dos Campos(23°N，46°W)，Yang 等报道了 $\lambda_z=0.42T_{ob}^{0.43}$ 的关系[4]。尽管各个地方都得到了类似的参数关系，但是观测到的 C、p 值却变化较大。对于一个给定的周期为 3 h 的常见重力波，在 Illinois 观测到的垂直波长约为 4.6 km (Gardner 的数据则为 6.9 km)，在 São José dos Campos 观测到的垂直波长为 3.9 km，在北京观测到的却是 3.54 km。这说明重力波活动具有明显的地区特性，在不同地点观测结果往往不尽相同。

重力波的线性饱和理论认为重力波垂直波数谱的形状和幅度值是由风剪切和对流不稳定性控制的，当重力波的幅度增长到对流或剪切不稳定点时，重力波将出现饱和，饱和重力波的垂直波数谱在高波数区域的谱指数近似为 $n=-3$ [6]。Gardner 的扩散滤波理论认为波致涡流扩散是重力波耗散的主要途径；在重力波向上传播时会被背景大气严重吸收，重力波垂直波数谱相应地出现选择性滤波效应。只有

那些有效垂直扩散速度(k_zD)小于垂直相速度(ω/k_z)的波的幅度才会随高度的增加而放大，才能传播到中层顶区域而被雷达观测到，其它重力波将会被严重衰减而消失。激光雷达在中层顶区域所观测到的重力波都是接近饱和的重力波(β 趋近于 0)，幅度也接近最大值，且都大致沿着扩散衰减极限线 $\omega=Dk_z^2$ 分布。所以，重力波参数之间才具有系统相关性，即 $\lambda_z\propto T_{ob}^{0.5}$、$KE\propto k_z^{-3}$ 和 $KE\propto f_{ob}^{-5/3}$[4,7]。在北京观测到的重力波参数关系为 $\lambda_z=0.226T_{ob}^{0.530}$、$KE=6.66\times10^{-10}k_z^{-3.091}$ 和 $KE=8.97\times10^{-6}f_{ob}^{-1.696}$，这些参数关系和扩散滤波理论、重力波的线性饱和理论所预测的结果是一致的。

Gardner and Voelz 认为波致涡流扩散是重力波耗散在大气中的主要途径，涡流扩散系数 D 可以通过雷达的观测数据进行计算[4]：

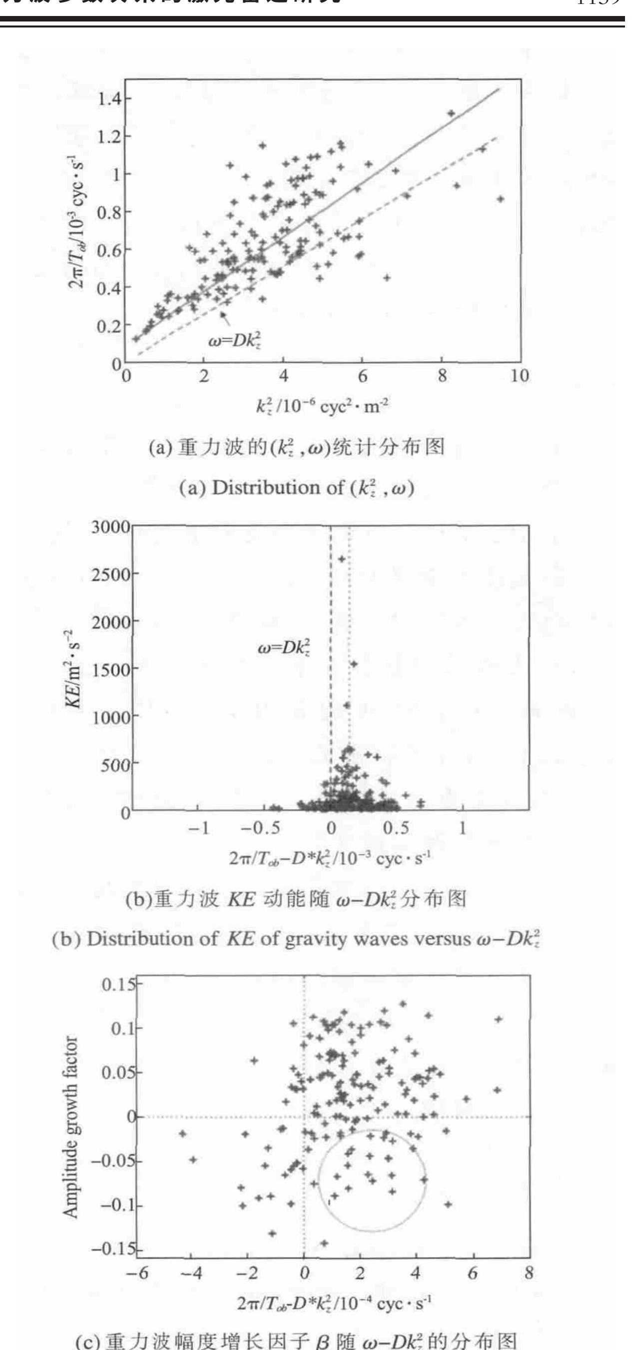
$$D(1-2H\beta)\frac{\lambda_z^3}{8\pi^2HT}\ \frac{\lambda_z^2}{8\pi^2}(d_\mu+\frac{d_\sigma}{\gamma}) \tag{5}$$

其中，d_μ 为由于粘滞效应引起的衰减系数；d_σ 为传导引起的衰减系数。在认为波致涡流扩散效应对应的衰减系数 d_w 远大于分子粘滞和热传导对应的衰减系数(即 $d_w>>d_\mu+\frac{d_\sigma}{\gamma}$)，且雷达在中层顶区域观测到的都是接近饱和的重力波(β 趋近于 0)，式(5)可以简化为：

$$D=\frac{\lambda_z^3}{8\pi^2HT}\approx\frac{\lambda_z^3}{8\pi^2HT_{ob}} \tag{6}$$

为了验证 Gardner 的扩散滤波理论，图 6(a)给出了北京雷达观测到的 162 个重力波的(k_z^2,ω)统计分布图；其中实线是对实验数据的最小二乘拟合，虚线是由式(6)计算出来的扩散衰减极限线 $\omega=Dk_z^2$。图中显示绝大数所观测到的数据点都满足 $\omega\geqslant Dk_z^2$ 的条件，即雷达观测到的重力波都满足有效垂直扩散速度小于重力波运动的垂直相速度，是没有被背景大气选择性衰减的重力波。

图 6(b)是雷达观测到的重力波的幅度值(KE 动能)随 $\omega-Dk_z^2$ 的分布图，图 6(c)是这些重力波的幅度增长因子 β 随 $\omega-Dk_z^2$ 的分布图。幅度分布统计结果显示，实验观测到的这些重力波并不是完全分布在 $\omega=Dk_z^2$ 衰减极限线附近，而是整体地向 $\omega>Dk_z^2$ 方向偏移。这表明雷达观测到的重力波并不完全是幅度值达到最大的重力波，即不完全是饱和了或趋近饱和的重力波。



(a) 重力波的(k_z^2,ω)统计分布图

(a) Distribution of (k_z^2,ω)

(b)重力波 KE 动能随 $\omega-Dk_z^2$ 分布图

(b) Distribution of KE of gravity waves versus $\omega-Dk_z^2$

(c) 重力波幅度增长因子 β 随 $\omega-Dk_z^2$ 的分布图

(c) Distribution of amplitude growth factor of gravity waves versus $\omega-Dk_z^2$

图 6 北京上空中层顶区域激光雷达观测到的重力波参数统计分析图

Fig.6 Statistic analysis on the parameter distribution of gravity waves observed by lidar in the mesopause region over Beijing

图 6(c)的统计结果进一步显示，在满足 $\omega\geqslant Dk_z^2$ 条件的重力波中，并不是所有重力波的幅度都是随高度增加而增大的，还有部分重力波的幅度是衰减的（增长因子 β 是负值）。图中圆圈中的数据点明显远离零位置线(即 $\omega=Dk_z^2$ 虚线和 β=0 虚线)，即使雷达数据统计分析中存在部分误差(通常小于 3%)，这

些数据点也是必然大量存在的。这说明 Gardner 的扩散滤波理论中仅认为波致涡流扩散效应是重力波幅度衰减的主要因素是不正确的;在实际大气重力波传播过程中,大气中的分子粘滞和热传导等效应也能导致重力波幅度的衰减,它们也可能在大气重力波的饱和和耗散机制中起到重要作用。

4 结 论

基于北京钠激光雷达对中层顶区域重力波活动的长期观测,采用 Yang 等的重力波参数提取方法,提取了 162 个钠层单色重力波的垂直波长、周期、幅度值和幅度增长因子,统计分析了北京上空中层顶区域重力波的参数关系。结果显示,激光雷达所观测到的重力波的参数具有系统相关性 $\lambda_z=0.226T_{ob}^{0.530}$、$KE=6.66\times10^{-10}k_z^{-3.091}$ 和 $KE=8.97\times10^{-6}f_{ob}^{-1.696}$。这些参数关系和 Gardner 的扩散滤波理论预测的结果是一致的,说明由于重力波在向上传播的过程中,背景大气对重力波具有明显的选择性滤波效应,激光雷达在中层顶区域观测到的大气重力波大致满足 $\lambda_z\propto T_{ob}^{0.5}$、$KE\propto k_z^{-3}$ 和 $KE\propto f_{ob}^{-5/3}$ 参数关系。但是,统计发现激光雷达在中层顶区域观测到的重力波并不是都趋近饱和的(幅度值最大),还有部分重力波的幅度值是衰减的;这表明扩散滤波理论中仅认为扩散效应是重力波幅度衰减的主要因素是不正确的。

参考文献:

[1] Fritts D C, Alexander M J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere[J]. ***Rev Geophys***, 2003, 41: 1003.

[2] Gardner C, Voelz D. Lidar measurements of gravity wave saturation effects in the sodium layer[J]. ***Geophys Res Lett***, 1985, 12: 765-768.

[3] Gardner C, Voelz D. Lidar studies of the nighttime sodium layer over Urbana, Illinois, 2. Gravity waves [J]. ***J Geophys Res***, 1987, 92(A5): 4673-4694.

[4] Yang G, Clemesha B, Batista P, et al. Lidar study of the characteristics of gravity waves in the mesopause region at a southern low-latitude location[J]. ***Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics***, 2008, 70(7): 991-1011.

[5] Gardner C S. Diffusive filtering theory of gravity wave spectra in the atmosphere [J]. ***J Geophys Res***, 1994, 99: 20601-20622.

[6] Dewan E M, Good R E. Saturation and the "universal" spectrum for vertical profiles of horizontal scalar winds in the atmosphere[J]. ***J Geophys Res***, 1986, 91: 2742-2748.

[7] Hines C O. The satuaration of gravity waves in the middle atmosphere, II. Doppler-spread theory [J]. ***J Atmos Sci***, 1991, 48: 1360-1379.

[8] Weinstock J. Saturated and unsaturated spectra of gravity waves and scale-dependent diffusion[J]. ***J Atmos Sci***, 1990, 47: 2211-2225.

[9] Yang G, Clemesha B, Batista P, et al. Improvement in the technique to extract gravity wave parameters from lidar data [J]. ***J Geophys Res***, 2008, 113: D19111.

[10] Xu J. Perturbations of the sodium layer: controlled by chemistry or dynamics?[J]. ***Geophys Res Lett***, 2003, 30(20): 2056.

[11] Beatty T J, Hostetler C A, Gardner C S. Lidar observations of gravity waves and their spectra near the mesopause and stratopause at Arecibo [J]. ***American Meteorological Society***, 1992, 49: 477-496.

[12] Collins R, Hallinan T, Smith R, et al. Lidar observations of a large high altitude sporadic Na layer during active aurora [J]. ***Geophys Res Lett***, 1996, 23(24): 3655-3658.

[13] Collins R L, Nomura A, Gardner C S. Gravity waves in the upper mesosphere over Antarctica: Lidar observations at the South Pole and Syowa[J]. ***J Geophys Res***, 1994, 99: 5475-5485.

[14] Gardner C, Taylor M. Observational limits for lidar, radar, and airglow imager measurements of gravity wave parameters [J]. ***J Geophys Res***, 1998, 103(D6): 6427-6437.